

苦草对不同浓度氮净化效果及其形态转化规律

王沛芳^{1,2}, 王超³, 王晓蓉², 薛艳¹, 杨爱¹

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 南京大学环境学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093; 3. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

摘要: 为研究不同营养程度下水生植物对污染物的净化效果, 选择长江中下游河流和湖泊水体中典型沉水植物苦草作为研究对象, 在 2006-09-07 ~ 2006-09-22 期间开展了 7 种氮浓度条件下, 苦草对水体氮的净化效应及氮在植物体内累积分布规律研究, 并分析了水体中氮形态的转化特征. 结果表明, 试验期内苦草在氮浓度低于 60.0 mg/L 范围内表现为对水体中氮较强的净化作用, 且对总氮的净化效果具有相似的规律性. 但是当水体氮浓度大于 80.0 mg/L 时, 苦草对水体氮净化的贡献无明显的规律性. 氮在植物体内的累积与水体中氮浓度相关, 但其在地下部和地上部的分配规律与浓度的差异无关. 水体中氮的形态转换与总氮浓度相关, 水中氮浓度低于 20.0 mg/L 时, 氨氮浓度迅速降低, 但随着氮浓度的增加, 氨氮所占比例明显增大, 表明苦草对不同氮浓度条件氮净化具有明显的差异和影响.

关键词: 苦草; 氮浓度; 净化效果; 氮分配; 氮形态

中图分类号: X171.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)04-0890-06

Purification Effects on Nitrogen Under Different Concentration and Nitrogen Conformation Transform Principles by *Vallisneria spiralis* L.

WANG Pei-fang^{1,2}, WANG Chao³, WANG Xiao-rong², XUE Yan¹, YANG Ai¹

(1. Key Laboratory of Intergrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Wet vegetation performed different physiological actions under different pollution loads, thus inducing different purification effects on pollutants. Since water of various rivers, lakes and ponds are polluted at different extents and purification levels currently in China, a typical submerged vegetation, *Vallisneria spiralis* L. is selected to study the purification effects on total nitrogen (TN) under different purification levels, which is widely distributed in rivers and lakes of Yangtz middle and down stream. The targets of this paper are to determine the nitrogen degradation impacts of *Vallisneria spiralis* L., and nitrogen accumulation and distribution in leaf and root rules, and inorganic nitrogen conformation transformation characters under 7 nitrogen loads during 7 to 22 Sept., 2006. The 7 nitrogen loads are 1.0 mg/L, 5.0 mg/L, 10.0 mg/L, 20.0 mg/L, 40.0 mg/L, 60.0 mg/L and 80.0 mg/L. The experiment data show that *Vallisneria spiralis* L. have significant effects on nitrogen purification while the TN concentration equal to and less than 60 mg/L, and the contribution principles of vegetation are similar among the 6 loads. Whereas, when the TN load bigger than 80.0 mg/L, *Vallisneria spiralis* L. have no obvious contribution on nitrogen purification. Meanwhile, the nitrogen accumulation principles in the leaf and root of *Vallisneria spiralis* L. is interrelated to the TN load. However, its distribution ratio in leaf to root is unrelated with TN load. Furthermore, the conformation of inorganic nitrogen transform characters changed with the TN load increasing. It is concluded that ammonia concentration decreased rapidly while the nitrogen load less than 20.0 mg/L, and the ammonia concentration ratio in the inorganic nitrogen increased remarkably with the nitrogen load increasing. Results indicate *Vallisneria spiralis* L. have different purification contribution extents which can be benefit for nitrogen removal in different eutrophicated water and wet vegetation restoration.

Key words: *Vallisneria spiralis* L.; nitrogen concentration; purification; nitrogen distribution; nitrogen conformation

当前,我国水环境质量逐渐恶化,多数水体富营养化严重.不同污染成因及不同形式的水体中营养物质的负荷差异也十分显著.沉水植物恢复作为水生生态系统修复及水体营养物质净化的重要措施,日益受到广大学者的关注.国内外关于水生植物对氮磷营养物及有机污染物质的净化能力研究十分广泛^[1~3],同时,利用沉水植物对水体进行湖泊河流生态修复的研究和应用也逐渐增加^[4,5].另一方面,国

内大量湖泊水体中由于营养物质超量累积导致沉水植物消亡,因此针对沉水植物对氮磷等污染物质的耐受能力研究较多,主要集中在研究水生植物消亡的关键因素和阈值范围方面^[6~8].但是,我国河流湖

收稿日期: 2007-04-11; 修订日期: 2007-05-30

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412303); 教育部重点科技项目(106088); 国家自然科学基金重点项目(50638082)

作者简介: 王沛芳(1973~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为水环境保护和生态修复, E-mail: pfwang2005@hhu.edu.cn

泊及坑塘等水体众多,其污染成因和污染程度各异,水体中氮磷的浓度也相差很大.当前的水生植物净化富营养化水体的研究中,氮的浓度主要参照湖泊水体的氮浓度,一般为 4 mg/L左右^[9~11].然而沉水植物在不同负荷条件下,对水体氮的净化效应是否存在差异以及不同负荷氮条件下水生植物生理特征是否产生变化,这方面的研究较少.同时,在沉水植物的研究方面,苦草(*Vallisneria spiralis* L.)由于是长江中下游湖泊常见的沉水植物物种而备受关注.因而,本试验选择 7 种氮浓度条件,开展了典型沉水植物苦草对水体中氮净化作用研究,分析了水体中氮形态转换关系,对利用沉水植物改善水环境质量及修复水生生态系统具有重要的指导作用.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验苦草采自西太湖,带泥培养在浅水湖泊重点实验室中的培养池内.本试验期为夏末初秋季节,水温范围 20~28℃,自然光照,pH 为 6.8~7.8.

1.2 试验方法

试验开始前,取适量苦草用自来水冲洗干净后在 4 个水箱内培养以适应试验环境.试验装置采用 8 组体积为 4 L 的聚乙烯塑料桶,每组 4 个.试验桶直径 25 cm,高 35 cm.桶底铺设 1 层卵石(购置于南京市雨花公司,粒径 0.5~1.0 cm),铺设厚度约 5 cm,能满足苦草根部分固定即可,以降低卵石对水体中氮的吸附作用.卵石在铺设前用自来水刷洗干净,超纯水润洗,并在超纯水中浸泡 3 d.

试验设置 7 种浓度的总氮,分别为 1.0、5.0、10.0、20.0、40.0、60.0 和 80.0 mg/L.每个处理设 3 个重复,1 个对照.对照试验桶中只设卵石,不种植苦草.试验时分别取 3~5 株生长健壮,均匀的苦草,用纯水洗净,称取植物鲜重后移植入试验桶中.试验桶中配置 1:10 改进后的修正 Hogland 营养液,氮浓度由无机氮 KNO₃-N 和(NH₄)₂SO₄-N 配制而成,其比例参照太湖水体中硝氮与氨氮的比例,取 1:1 进行配制.

1.3 监测指标及方法

水体的测量指标有温度、pH 值、总氮、氨态氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮,依据文献[12]的方法分析测定.植物指标的测定包括植物的鲜重,地上部和地下部的鲜重,以及地上部和地下部中全氮的含量.植物体内氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮、奈氏比色法^[13].

1.4 数据分析方法

各处理组苦草对水体中氮的净化效果是在有植物处理的基础上减去对照的净化率得出.数据分析采用 SPSS11.5 分析软件中的独立样本的 *t* 检验方法及相关性分析方法对数据进行分析.

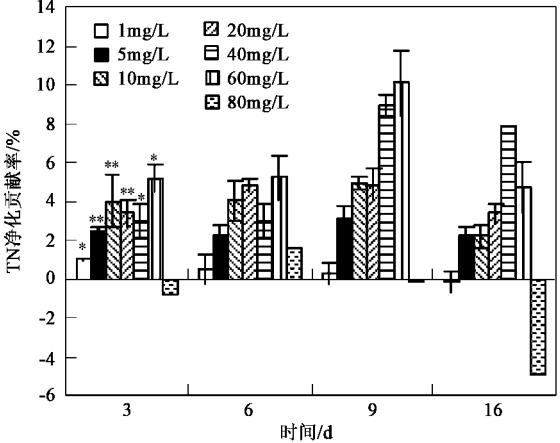
2 结果与分析

2.1 不同氮浓度条件下苦草对水体中氮的净化效果

图 1 是不同处理组状况下苦草对水体氮的净化率贡献值随时间的变化规律.差异性分析表明,苦草在水体中氮浓度为 5.0、10.0、20.0、40.0 和 60.0 mg/L 时对氮净化率具有显著差异(*p* < 0.05),并且浓度为 5.0、10.0 和 20.0 mg/L 条件下表现为极显著水平(*p* < 0.01).

由图 1 分析可知,在试验期内,苦草对水体中氮的净化率随水体中氮浓度的变化而呈现较为明显的差异.在相同的采样日期,总氮浓度 1.0~60.0 mg/L 范围内,苦草对水体氮的净化率随氮浓度的增加总体表现为升高趋势,特别是第 9 d 时规律最为明显,水体中氮浓度为 1 mg/L 时,苦草净化率值为 0.30%,20.0 mg/L 时为 4.86%,而 60 mg/L 时高达 10.09%.但是,氮浓度 80.0 mg/L 条件下,苦草对水体氮的净化贡献降低,甚至出现负值.表明苦草在氮浓度为 80 mg/L 时表现出抑制作用.同时,在 16 d 试验期内,氮浓度为 1.0~60.0 mg/L 条件下,同种负荷时苦草对水体氮净化的贡献率随时间的增加呈现前 9 d 增长而后下降的趋势.但是,负荷为 80 mg/L 时规律不明显.

对 1.0~60.0 mg/L 范围内总氮浓度与苦草氮净



* 代表差异的极显著水平(*p* < 0.05)
* * 代表差异的极显著水平(*p* < 0.01)
图 1 苦草对氮的净化率随氮浓度变化规律
Fig.1 Nitrogen purification effects changing principles with different nitrogen concentration

化贡献率进行相关性分析表明,两者呈现明显的正相关关系.特别是在试验进行的第9 d,苦草对氮的净化率与水体中氮浓度的相关系数 r 高达0.945,且为极显著性水平.

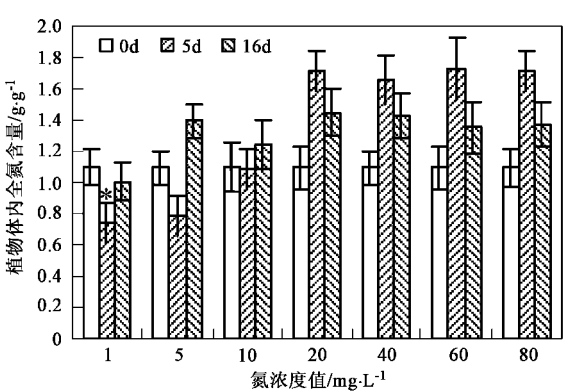
总体而言,试验期内水体中氮浓度在低于60.0 mg/L范围内时,苦草表现为对水体中氮的净化作用,且对总氮的净化贡献具有相似的规律性.前9 d内对氮的去除表现为逐渐增加,之后逐渐降低.而且这种趋势随着氮浓度的升高程度表现得更为显著:在总氮初始浓度为1.0、5.0、10.0、20.0 mg/L时,苦草对水体中氮的净化率较为稳定,先逐渐升高至净化率达到0.30%~4.86%,第9 d后下降.氮浓度为60.0 mg/L时第9 d高达10.09%以上,第11 d迅速降低为4.71%.但是,当水体中氮浓度达80.0 mg/L时,苦草对氮的净化无明显的规律性,甚至出现净化率负值,说明过高浓度的氮对苦草的生长出现了拟制作用,苦草在此浓度条件下对水体中氮的净化没有明显的作用.

2.2 不同氮浓度条件下植物体内氮累积特点

苦草无直立茎,其生长的营养来自地下根部从基质中吸取,以及依赖带形的大量叶片从水体中吸收营养物质.另外,苦草在春季发芽时就生成了大量根状茎,这些根状茎形成致密的丝状体幼芽,幼芽向上生长发出绿叶进行光和作用,向下伸出须状根从基质中吸收营养.9月份是苦草生物量相对较大的时期^[14],因此,苦草在加入营养盐后表现出活跃的生命活动.图2是单位鲜重苦草氮累积量的变化规律.由图2可知,苦草植株内的氮含量与水体中氮浓度正相关.其中,第5 d的相关系数 r 为0.797,且差异显著($p < 0.05$).并且当水体中氮浓度低于10.0 mg/L时,相关系数 r 高达0.944,而当总氮在20.0~80.0 mg/L之间时差异不明显,甚至在第16 d时表现为负相关($r = -0.857$).同时,在第16 d时苦草在低负荷条件下表现出对氮的继续吸收,而对20 mg/L以上时表现出苦草体内氮释放.这与童昌华等^[4]在富营养化水体的水生植物净化试验研究中的结果相一致.

2.3 氮在苦草地下部和地上部间的分配

试验中将卵石内的部分划分为地下部,以上为地上部.表1是苦草地上部和地下部中氮含量比例的变化.由表1中数据及相关性分析可知,氮浓度对苦草体内氮在地下部和地下部分配具有一定的相关性.试验初期,苦草体内地上部和地下部的氮含量相当,为567.5:526.7.试验进行到第6 d时,地下部和



* 代表差异的极显著水平($p < 0.05$)

图2 苦草体内氮累积随水体中氮浓度变化规律

Fig.2 Nitrogen accumulation principles with different nitrogen concentration

地上部氮的含量均有明显变化,地上部和地下部苦草体内氮含量均与水体中氮浓度呈正相关,特别是第5 d的地上部为极显著正相关($p < 0.01$, $r = 0.864$),地下部为显著正相关($p < 0.05$, $r = 0.746$).但两者的分配比例与氮浓度无明显相关性.当水中氮浓度低于10.0 mg/L时,苦草地上部中的氮含量降低,氮通过叶片的渗透压力向水体释放以保证植物系统的物质浓度平衡,且水体中氮浓度越低,苦草体内氮释放量越大.而浓度为10.0 mg/L及以上的水体中,苦草地上部表现出对氮的强烈吸收,其中,60.0 mg/L浓度时地上部吸收量最高,这与60.0 mg/L负荷时苦草对水体中氮净化贡献率最高相一致.分析苦草地下部的氮吸收可知,水体中氮浓度低于10.0 mg/L时根中氮也向水中释放平衡,高于10.0 mg/L时,根也表现出对氮的强烈吸收.到第16 d,除1.0 mg/L浓度外,其他氮浓度条件下苦草地上部和地下部对氮均表现为吸收.总体上,地上部在氮浓度值为20.0~40.0 mg/L时,体内氮含量较高,在负荷值为5.0 mg/L时,地下部氮含量最高.

随着时间的推移,苦草体内地上部和地下部氮的含量也呈现一定的变化规律.16 d后苦草的地上部对氮吸收能力在低浓度条件下(< 20.0 mg/L)较第6 d时呈现增加趋势,而高浓度下明显降低,且水体中氮浓度越高降低越显著,如氮浓度60 mg/L时由1 047.6 $\mu\text{g/g}$ (以鲜重计)降低为806.3 $\mu\text{g/g}$ (以鲜重计),而80 mg/L时由1 001.7 $\mu\text{g/g}$ (以鲜重计)降低到780.7 $\mu\text{g/g}$ (以鲜重计).地下部氮的含量在16 d时与氮浓度呈负相关,其基本规律与地上部相同.但两者的分配比例与氮浓度亦无明显相关性.

表 1 苦草地上部和地下部中氮含量随水体中氮浓度变化规律¹⁾/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Table 1 Nitrogen accumulation principles changing with nitrogen concentration/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

时间 /月-日	部位	水体中氮浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$						
		1.0	5.0	10.0	20.0	40.0	60.0	80.0
09-07	地上部	567.5	567.5	567.5	567.5	567.5	567.5	567.5
	地下部	526.7	526.7	526.7	526.7	526.7	526.7	526.7
09-12	地上部 ^{a**}	443.0	504.1	649.6	903.9	987.9	1 047.6	1 001.7
	地下部 ^{b**}	299.6	283.4	431.3	808.2	673.7	712.4	684.8
09-22	地上部 ^{**}	521.9	678.8	691.8	912.5	897.3	806.3	780.7
	地下部 ^{**}	480.9	714.2	553.5	533.3	528.8	570.5	566.2

1) ** 代表差异的极显著性水平($p < 0.01$); a、b 分别代表氮在植物体内的含量随水体中氮浓度变化的极显著相关性和显著相关($p < 0.01$, $p < 0.05$)

2.4 水体中无机氮的形态转换与氮浓度的关系

试验原水配制中氮主要由无机态氮 $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4、\text{KNO}_3]$ 组成,初始水质的监测结果表明各负荷原水中 NH_4^+-N 与 NO_3^--N 比例为 1 : 1, 不含 NO_2^--N .在试验期内水体氮形态的变化参见图 3.由图 3 可知,不同氮浓度条件下苦草作用的水体中,硝

酸盐氮占较大比例,氨氮含量其次,亚硝酸盐含量最低.但是,随着总氮浓度的增加,特别是总氮浓度大于 20 mg/L 以上时,氨氮所占比例显著增加.同时,随着时间的增加,氨氮比例呈现逐渐降低的趋势.这与氨氮在好氧条件下易于发生硝化,以及氨氮更易于被沉水植物优先吸收从而与浓度降低迅速有关^[15].

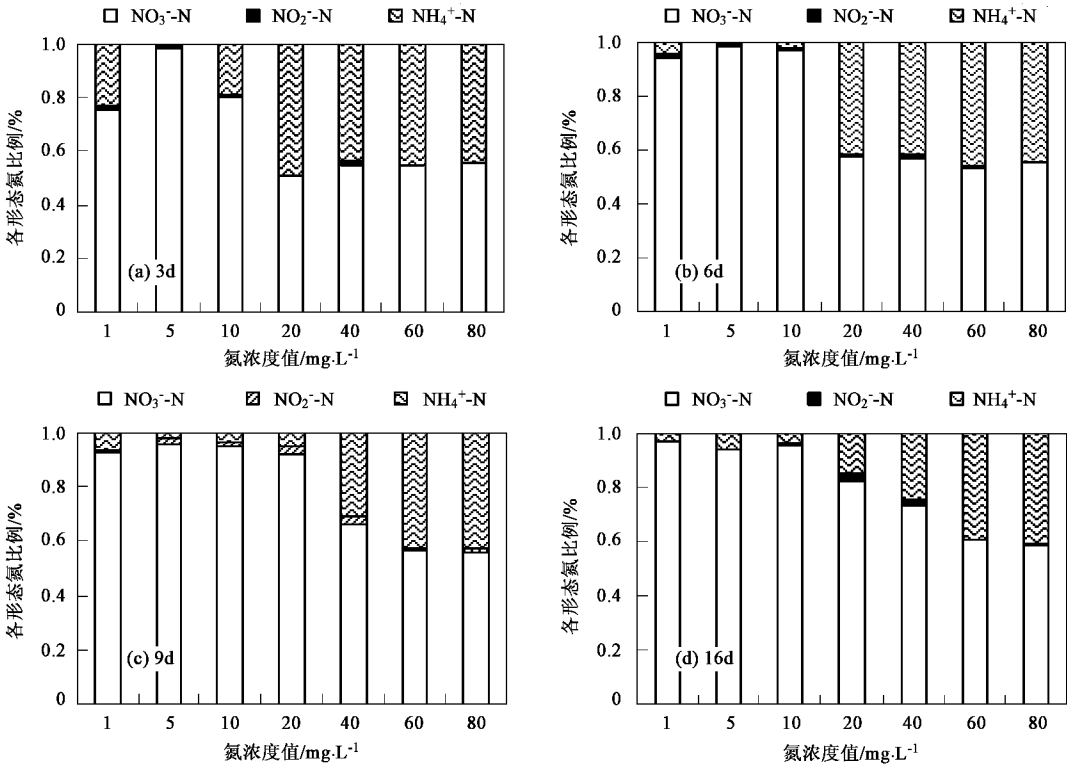


图 3 不同氮浓度条件下水体中氮形态转化规律
Fig.3 Nitrogen conformation transform principles with different nitrogen concentration

3 讨论

3.1 苦草对不同浓度氮的净化作用

地表水体中,水生植物对中营养元素氮的净化作用主要表现在同化吸收、改善根系微生态环境从

而增进微生物的生化作用,以及通过提高悬浮物的沉降等方面^[16,17].其中,植物吸收作用对水体中氮净化的贡献一般在 10% 左右^[1,18].本试验期是苦草生物量最高的时期,对营养元素氮的吸收也相对较高,因此对水体中氮的净化率最高可达 10.09%,这与

文献[18]是一致的.按照平均生物量对水体的总氮净化率计算,苦草在9月的试验期内水体中氮浓度为10.0 mg/L时,总氮平均去除速率为20.99 mg/(kg·d),基本与李修岭等^[19]11月在45 d的培养周期中,水体总氮10.0 mg/L时凤眼莲对总氮的平均去除速率21.65 mg/(kg·d)的结果相当.实际上,在同等条件下凤眼莲对水体中氮的吸收净化效果高于苦草^[20],但由于冬季凤眼莲生命活力降低因此表现出与苦草相近的氮去除速率.

水生植物对外界的生存环境具有一定的适应性,过度的营养负荷也会抑制植物的生长.万志刚等^[8]通过测定植株体内过氧化物酶活性指标的变化,初步找出了几种水生维管束植物对水体中总氮、总磷的耐受性规律.以凤眼莲(水葫芦)对氮、磷元素的耐受性最高,水体中氮浓度达到1 514.26 mg/L时死亡,对水体中氮耐受性最差的是浮萍和水鳖,即水体中氮浓度达到551.04 mg/L时死亡.苦草对氮耐受性略高于浮萍.曹特等^[21]研究了4种沉水植物在富营养水体中生长胁迫和POD活性的变化.研究表明水培条件下1.0 mg/L氨氮促进金鱼藻生长,5.0 mg/L氨氮开始抑制生长.本研究通过考察不同氮浓度条件下(氨氮:硝酸盐氮=1:1)氮在苦草体内累积状况,得出了当水体负荷在60.0 mg/L时,苦草对其净化贡献值最高,可达10.09%.超过80.0 mg/L时,苦草的净化作用受到抑制,对水体氮净化率急剧下降.

3.2 氮在苦草体内累积特性

随着苦草对水体中氮吸收总量的增加,氮在植物体内累积量不断增大^[22].沈根祥等^[23]研究了浮萍对富营养化水体中氮的吸收动力学.结果表明浮萍优先吸收净化铵态氮,并且随着2种氮浓度的增加,浮萍对氮的吸收速率均为增加的趋势.彭剑峰等^[24]对浮萍塘中氮的净化归趋进行了试验研究和模型模拟,认为浮萍吸收对氨氮净化在高温期占2.99%,对硝酸盐的净化占氮净化的1.51%.在不同氮构成的条件下植物体内氮吸收及分布研究方面,陆生植物特别是蔬菜类植物中研究较多,主要针对硝酸盐氮在植物体内的累积研究.张英鹏等^[25]同时发现当营养液中硝铵比为50:50时,菠菜遭受氧化胁迫的程度较小.

3.3 氮分配特点及水体中氮形态转化的关系

王君等^[26]对不同富营养化水体氮在穗花狐尾藻中累积和分配特点的研究发现,氮在植物根、茎、叶中的分布受水体氮浓度、氨氮和硝酸盐氮比例及生长生理过程等因素的影响.苦草无明显茎,主要为

叶片和地下根部,而对于单体植株叶片比例较大,故此地上部氮累积量相对较大.但由于本试验期内苦草处于生长旺盛结束阶段,部分植株开始开花,进入结果期.因此,地上部与地下部对氮的累积分配差异不大.另一方面,水体中氨氮和硝酸盐氮的含量及比例会影响植物体内氮的吸收,特别是硝态氮和铵态氮的吸收.这是今后试验中需深入开展的研究方面.

在水体中氮形态变化方面,氨氮浓度在试验初期的3 d内就有显著的降低,特别是当TN负荷在10 mg/L以下时,水体中氨氮比例较低.氮浓度高于20 mg/L时氨氮降低较为缓慢,而且浓度越高降低越慢.或许由于植物在高氨氮条件下出现对氨氮吸收的抑制,导致高负荷条件下氨氮净化减缓,其原理有待于进一步试验研究进行分析.

4 结论

(1)通过试验研究苦草对水体中不同浓度氮(氨氮:硝酸盐氮=1:1)的净化贡献率,分析了氮在体内累积状况,得出了当水体中氮浓度低于60.0 mg/L时,苦草表现为对水体中氮的净化作用,且当水体氮浓度为60.0 mg/L时,苦草对其净化贡献值最高,试验期内可达10.09%.超过80.0 mg/L时,苦草的净化作用受到抑制,对水体氮净化贡献率急剧下降.

(2)试验中,单位鲜重苦草内氮累积量随水体中氮浓度的增加呈现逐渐增长的趋势,这种差异在水体中氮浓度高于20.0 mg/L时表现得不显著.而且,植物体内氮含量在地上部与地下部的累积分配差异不大.

(3)在试验原水条件下,由于苦草对氮的净化作用,使得不同氮浓度条件下苦草作用的水体中硝酸盐氮所占比例较大,氨氮含量其次,亚硝酸盐含量最低.但是,随着总氮浓度的增加,特别是总氮浓度大于20 mg/L以上时,氨氮所占比例显著增大.

参考文献:

- [1] Schulz M, Rinke K, Köhler J. A combined approach of photogrammetrical methods and field studies to determine nutrient retention by submersed macrophytes in running waters[J]. *Aquatic Botany*, 2003, **76**(1): 17-29.
- [2] Uusi-Kamppa J, Ylaranta T. Reduction of sediment, phosphorus and nitrogen transport on vegetated buffer strips[J]. *Agricultural Science of Finland*, 1992, **1**: 569-575.
- [3] Mihara M. The effect of natural weed buffers on soil and nitrogen losses in Japan[J]. *Catena*, 2006, **65**(3): 265-271.
- [4] 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 富营养化水体的水生植物净化试验研究[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(8): 1447-1450.

[5] Jiang C L, Fan X Q, Zhang Y B. Absorption and prevention of secondary pollution of N and P by emergent plants in farmland ditch [J]. Journal of China Environmental Science, 2004, **24**(6): 702-706.

[6] Chen B M, Wang Z H, Li S X, *et al.* Effects of nitrate supply on plant growth, nitrate accumulation, Metabolic nitrate concentration and nitrate reductase activity in three leafy vegetables[J]. Plant Science, 2004, **167**(3): 635-643.

[7] Irfanullah H M, Moss B. Factors influencing the return of submerged plants to a clear-water, shallow temperate lake[J]. Aquatic Botany, 2004, **80**(3): 177-191.

[8] 万志刚, 顾福根, 孙丙耀, 等. 6 种水生维管束植物对氮和磷的耐受性分析[J]. 淡水渔业, 2006, **36**(4): 37-41.

[9] 朱增银, 王君, 尹大强, 等. 不同比例硝态氮和尿素氮对苦草的生理影响[J]. 南京大学学报(自然科学), 2005, **41**(6): 627-633.

[10] 包先明, 陈开宁, 范成新. 浮叶植物重建对富营养化湖泊氮磷营养水平的影响[J]. 生态环境, 2005, **14**(6): 807-811.

[11] 雷泽湘, 徐德兰, 黄沛生, 等. 太湖沉水和浮叶植被及其水环境效应[J]. 生态环境, 2006, **15**(2): 239-243.

[12] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 144-178.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 264-268.

[14] 熊秉红, 李伟. 鄱阳湖自然保护区蚌湖和中湖池苦草冬芽的调查[J]. 水生生物学报, 2002, **26**(1): 19-25.

[15] 金送笛, 李永函, 倪彩虹, 等. 菹草(*Potamogeton crispus*)对水体中氮、磷的吸收及若干影响因素[J]. 生态学报, 1994, **14**(2): 168-174.

[16] Schulz M, Kozerski H P, Pluntke T, *et al.* The influence of macrophytes on sedimentation and nutrient retention in the Lower River Spree (Germany) [J]. Water Research, 2003, **37**(2): 569-578.

[17] 李睿华, 管运涛, 何苗, 等. 河岸芦苇、茭白和香蒲植物带处理受污染河水中试研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 493-497.

[18] 王超, 王沛芳, 唐劲松, 等. 河道沿岸芦苇带对氨氮的削减特性研究[J]. 水科学进展, 2003, **14**(3): 311-317.

[19] 李修岭, 李伟, 李夜光, 等. 几种植物去除高度富营养化湖水中氮磷及抑藻效果的初步研究[J]. 武汉植物学研究, 2005, **23**(1): 53-57.

[20] 万志刚, 沈颂东, 顾福根, 等. 几种水生维管束植物对水中氮、磷吸收率的比较[J]. 淡水渔业, 2004, **34**(5): 6-8.

[21] 曹特, 倪乐意. 金鱼藻抗氧化酶对水体无机氮升高的响应[J]. 水生生物学报, 2004, **28**(3): 299-303.

[22] 范国兰, 李伟. 穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum* L.)在不同程度富营养化水体中的营养积累特点及营养分配对策[J]. 武汉植物学研究, 2005, **23**(3): 267-271.

[23] 沈根祥, 姚芳, 胡宏, 等. 浮萍吸收不同形态氮的动力学特性研究[J]. 土壤通报, 2006, **37**(3): 504-508.

[24] 彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 等. 浮萍塘中氮归趋模式模拟分析[J]. 环境科学, 2006, **27**(10): 1963-1969.

[25] 张英鹏, 林咸永, 章永松, 等. 不同氮素形态对菠菜生长及体内抗氧化酶活性的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2006, **32**(2): 139-144.

[26] 王君, 顾宇飞, 纪东成, 等. 富营养条件下不同形态氮对轮叶黑藻(*Hydrillaverticillata*)的生理影响[J]. 环境科学研究, 2006, **19**(1): 71-76.